

P9-2004-170

Ю. Г. Аленицкий, А. С. Ворожцов, С. Б. Ворожцов,  
А. А. Глазов, В. П. Дмитриевский, Н. Л. Заплатин,  
В. В. Калиниченко, Г. А. Карамышева, С. А. Костромин,  
Н. А. Морозов, Л. М. Онищенко, Е. В. Самсонов

**ЦИКЛОТРОН-ИНЖЕКТОР ЦИ-5  
ДЛЯ ФАЗОТРОНА ОИЯИ**

Аленицкий Ю. Г. и др.

P9-2004-170

Циклотрон-инжектор ЦИ-5 для фазотрона ОИЯИ

В качестве инжектора для фазотрона ОИЯИ рассматривается секторный изо-хронный циклотрон ЦИ-5 с конечной энергией  $H^-$ -ионов, равной 5 МэВ, и средним током пучка 10–30 мА. Представлены результаты трехмерного компьютерного моделирования магнитной и ускоряющей систем циклотрона, а также динамики частиц с учетом эффектов пространственного заряда. Численные расчеты, проведенные по принципиально отличным методикам, показали один результат: эффекты пространственного заряда позволят ускорить  $H^-$ -ионы с проектной интенсивностью.

Работа выполнена в Лаборатории ядерных проблем им. В. П. Дзелепова ОИЯИ.

Сообщение Объединенного института ядерных исследований. Дубна, 2004

Перевод авторов

Alenitsky Yu. G. et al.

P9-2004-170

Cyclotron-Injector CI-5 for JINR Phasotron

The separated sector cyclotron CI-5 with the extraction energy of  $H^-$  ions 5 MeV and beam intensity 10–30 mA for injection into the JINR Phasotron is considered. The results of 3D electromagnetic-field calculations of magnetic and accelerating systems are presented. A number of dynamic simulations taking into account space charge effects using fundamentally different methods confirm that the current limit for separated turns is about 30 mA for this cyclotron.

The investigation has been performed at the Dzheleпов Laboratory of Nuclear Problems, JINR.

Communication of the Joint Institute for Nuclear Research. Dubna, 2004

## ВВЕДЕНИЕ

Для увеличения интенсивности фазотрона ОИЯИ с 5 до 50 мкА разрабатывается проект внешней инъекции пучка в центральную область ускорителя.

Внешняя инъекция пучка в фазотрон предполагает инжектирование пучка путем последовательной двухступенчатой перезарядки  $H^-$ -ионов сначала в  $H^0$ , а затем в  $H^+$  и сводится к осуществлению проектов по созданию

- инжектора;
- линии транспортировки пучка между инжектором и фазотроном;
- системы вывода пучка из фазотрона с эффективностью более 90 %.

Схема внешней инъекции в фазотрон ОИЯИ представлена на рис. 1.

В канале транспортировки пучка из инжектора в фазотрон [1] предусмотрены элементы юстировки и фокусировки пучка. Для увеличения эффективности захвата пучка планируется использовать группирователь пучка (банчер), который служит для уменьшения расстояния по фазе между центрами инжектируемых сгустков, и магнит-селектор, предназначенный для разделения в горизонтальной плоскости банчей пучка, с целью их инъекции в фазотрон на равновесные орбиты, соответствующие их средней энергии.

В качестве инжектора рассматривается секторный изохронный циклотрон ЦИ-5 с конечной энергией  $H^-$ -ионов, равной 5 МэВ, и средним током пучка 10–30 мА. В циклотрон ЦИ-5  $H^-$ -ионы инжектируются после ускорения в предварительном инжекторе до энергии 500 кэВ.

### 1. ТРАКТ ИНЖЕКЦИИ ПУЧКА В ЦИКЛОТРОН ЦИ-5

Структура тракта инъекции пучка в циклотрон ЦИ-5 приведена на рис. 2. Инжекция осуществляется в горизонтальной плоскости циклотрона в до-

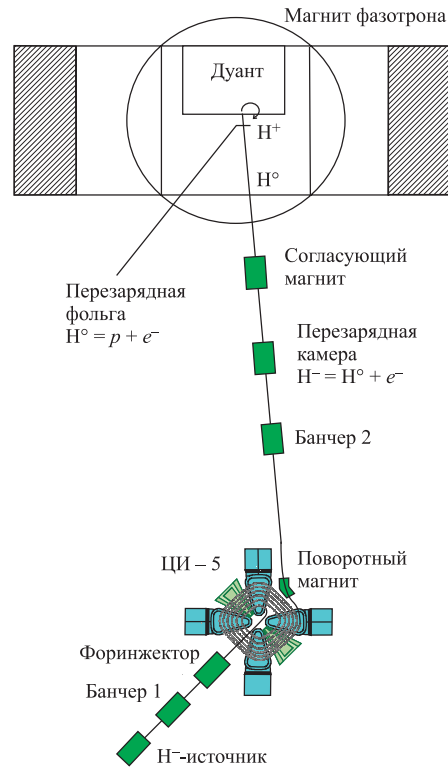


Рис. 1. Схема внешней инъекции в фазотрон

лине между его секторными магнитами, в которой реализуется также и вывод ускоренного пучка из циклотрона. Пучок  $H^-$ -ионов из высоковольтного

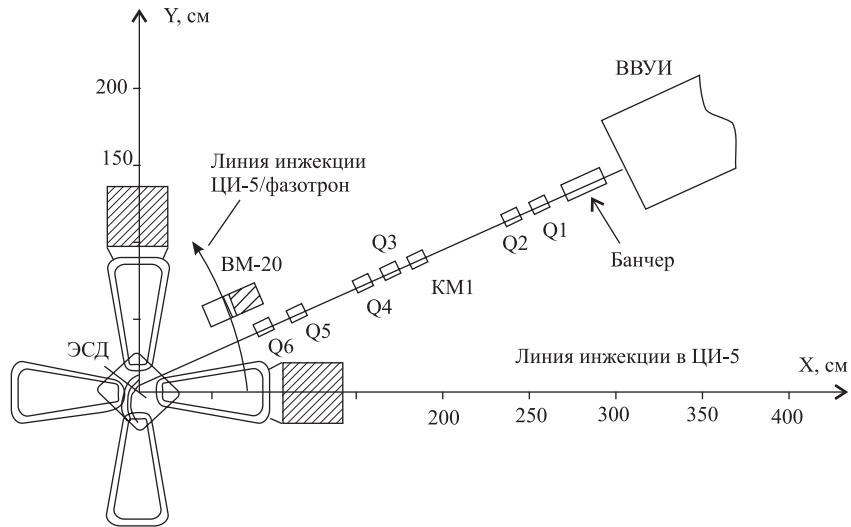


Рис. 2. Схема тракта инъекции пучка в циклотрон ЦИ-5

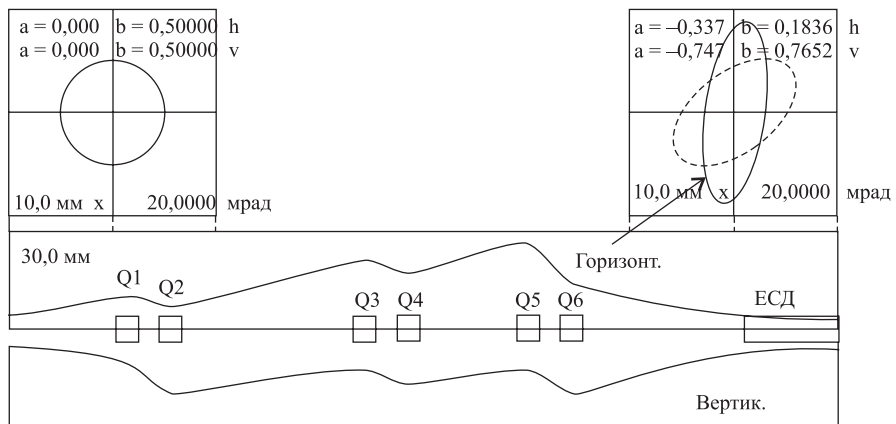


Рис. 3. Результаты расчета поперечной динамики пучка в тракте инъекции пучка в циклотрон ЦИ-5

ускорителя-инжектора (ВВУИ) проходит через банчер пучка, осуществляющий его группировку в диапазон фаз  $\pm 15^\circ$ . Поперечная фокусировка пучка

осуществляется при помощи трех дублетов квадрупольных магнитных линз (Q1–Q6). Поворот пучка и его вывод в точку инжекции в циклотрон реализуется при помощи электростатического дефлектора (ЭСД). Коррекция положения пучка в вертикальном и горизонтальном направлениях ведется при помощи магнита KM1.

Расчет поперечной динамики пучка в тракте инжекции проводился при помощи программы TRACE-3D с учетом заряда пучка (максимальный ток пучка 30 мА). Результаты расчета (начальные, конечные поперечные эмиттансы, огибающие пучка) приведены на рис. 3.

## 2. СИЛЬНОТОЧНЫЙ ЦИКЛОТРОН-ИНЖЕКТОР ЦИ-5

Циклотрон-инжектор ЦИ-5 имеет магнитную структуру с четырьмя разделенными секторами и ускоряющую систему, состоящую из двух полуволновых резонаторов. Основные параметры ускорителя приведены в табл. 1.

### 2.1. Магнитная система.

Для циклотрона ЦИ-5 была выбрана секторная структура магнитного поля, ввиду необходимости получения большого флаттера, что важно для ускорения пучков большой интенсивности. Кроме того, секторная структура магнита позволяет разместить ускоряющие резонаторы в промежутках между секторами и за счет этого обеспечить большой набор энергии за оборот. Параметры магнитной системы циклотрона ЦИ-5, компьютерная модель которой изображена на рис. 4, представлены в табл. 2.

Для анализа динамики пучка установки были проведены трехмерные расчеты магнитной системы циклотрона, результатом которых явилось получение карты магнитного поля. На рис. 5 приведены результаты расчетов магнитного поля:

Таблица 1

Тип циклотрона	Секторный
Ускоряемая частица	$H^-$
Энергия инжекции, МэВ	0,5
Конечная энергия, МэВ	5,0
Интенсивность, мА	10, 30
Частота обращения, МГц	6,7965
Кратность ускорения	8
Частоты свободных колебаний:	
радиальных	1,1–1,2
аксиальных	0,8–0,9

Таблица 2

Магнитная система	
Число секторов	4
Угловая протяженность сектора, °	24–38
Межполюсный зазор, см	4
Радиальная протяженность полюса, см	18–88
Среднее магнитное поле, Т	0,43
Флаттер	0,8–0,95

$B_0$  — среднее магнитное поле в зависимости от радиуса;  $B_4$ ,  $B_8$ ,  $B_{12}$  — амплитуды 4, 8 и 12-й гармоник магнитного поля (соответственно).

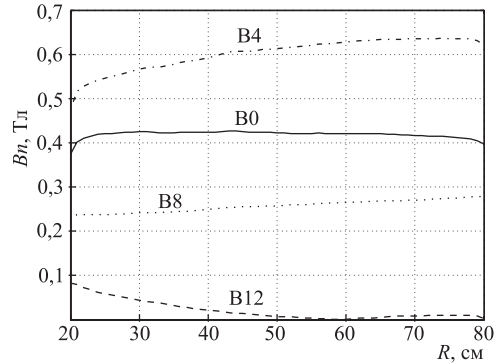
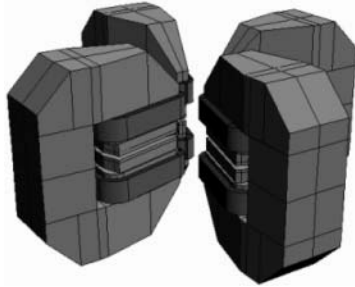


Рис. 4. Магнитная система циклотрона Рис. 5. Магнитное поле циклотрона ЦИ-5

**2.2. Ускоряющая система.** Для ускорения  $H^-$ -ионов в циклотроне предполагается использовать высокочастотный полуволновой резонатор. Резонатор содержит короткозамкнутые отрезки коаксиальных линий 1 и 2, корпус 3 (см. рис. 6, а), на рис. 6, б показаны элементы, находящиеся внутри корпуса 3: «рамки», и  $\Delta$ -электрод, на рис. 6, в — отдельно  $\Delta$ -электрод. Основные параметры резонатора даны в табл. 3.

Таблица 3

Ускоряющая система	
Резонансная частота, МГц	54,372
Расчетная добротность	5700
Число $\Delta$ -электродов	2
Угл. протяж. $\Delta$ -электродов, °	16,5
Радиальная протяженность $\Delta$ -электродов ( $R_{\min}/R_{\max}$ ), мм	180/770
Ширина ускорительной щели, °	6
Аксиальная апертура, см	3
ВЧ-напряжение, кВ	175–220

Заметим, что радиальная протяженность корпуса резонатора 87 см, это минимальное значение, достаточное для ускорения ионов до энергии 5 МэВ. Расстояние между короткозамыкающими заглушками подобрано для обеспечения необходимой частоты ускоряющего поля (заглушки располагаются симметрично относительно медианной плоскости). Подобная конструкция обеспечивает рост ускоряющего напряжения с увеличением радиуса. Были

проведены трехмерные численные расчеты ВЧ-резонатора, которые показали, что ускоряющее напряжение увеличивается от центра к периферии прибли-

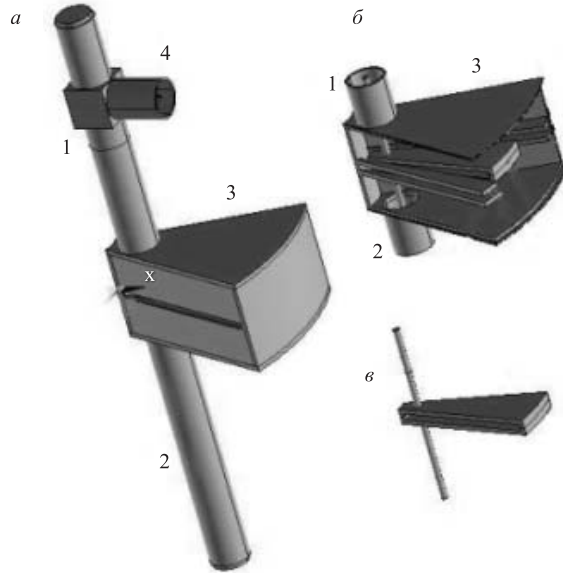


Рис. 6. Вид резонатора

тельно в 1,3 раза (см. рис. 7) [2]. На рис. 7 штриховая линия соответствует расчету по аналитическим формулам, сплошная — численному расчету по программе, использующей метод конечных элементов. Видно хорошее соответствие между полученными результатами.

В результате расчетов были получены карты электрического и магнитного полей резонатора. На рис. 8 показаны зависимости составляющих электрического поля  $E_\varphi$ ,  $E_r$ ,  $E_z$  от радиуса,  $E_\varphi$ ,  $E_r$  даны для середины ускоряющего промежутка в медианной плоскости,  $E_z$  — для  $z=0,8$  см и азимутального угла, соответствующего максимуму  $E_z$ .

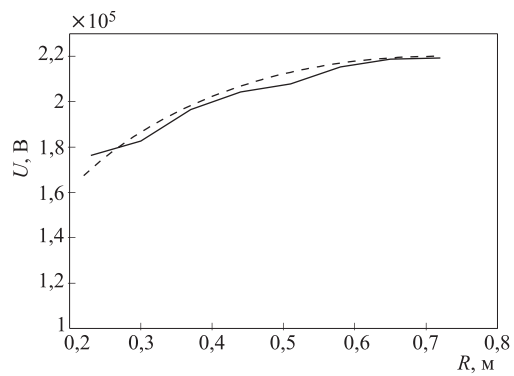


Рис. 7. Зависимость ускоряющего напряжения резонатора от радиуса циклотрона

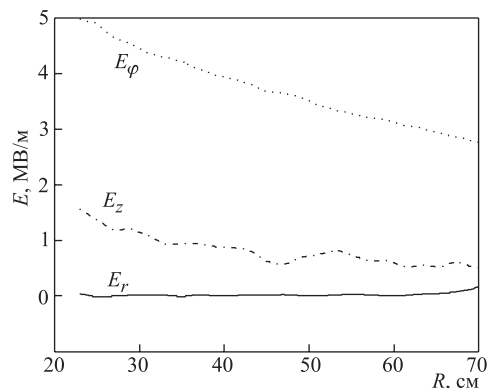


Рис. 8. Зависимости составляющих электрического поля  $E_\varphi$ ,  $E_r$ ,  $E_z$  от радиуса

### 2.3. Динамика пучка в циклотроне.

Для инжекции в фазотрон ОИЯИ необходимо ускорить пучок ионов с интенсивностью 10–30 мА. При проектировании циклотрона с таким средним током пучка необходимо иметь детальную информацию о влиянии пространственного заряда на динамику частиц. В отделе новых ускорителей ЛЯП ОИЯИ была проведена тщательная теоретическая проверка возможности ускорения интенсивных пучков в секторном циклотроне ЦИ-5. Для решения этой задачи были созданы программы PHASCOL [3], KASCADS [4], позволяющие исследовать эффекты пространственного заряда. Также использовались ранее написанные программы других авторов, такие как NAJO [5], PICS [6]. Численные расчеты, проведенные авторами по принципиально отличным методикам, показали возможность ускорить  $H^-$ -ионы с проектной интенсивностью [2–6].

На рис. 9–11 представлены результаты численных расчетов динамики пучка в циклотроне-инжекторе с учетом эффектов пространственного заряда. Для рас-

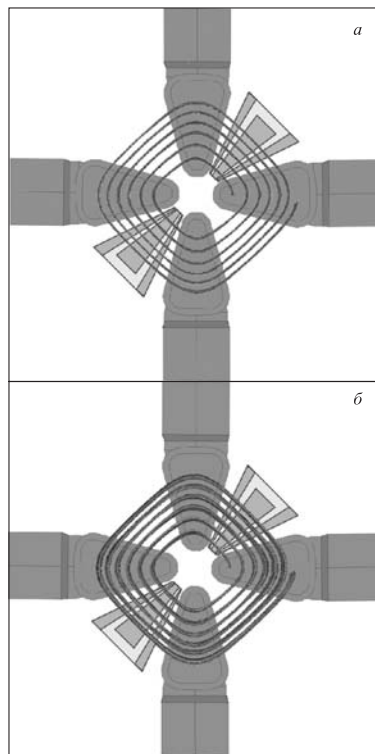


Рис. 9. Орбиты частиц в ускорителе ( $I = 0$  мА (а),  $I = 30$  мА (б))



четов использовались карты электрического и магнитного полей, полученные в результате численных трехмерных расчетов магнитной и ускоряющей

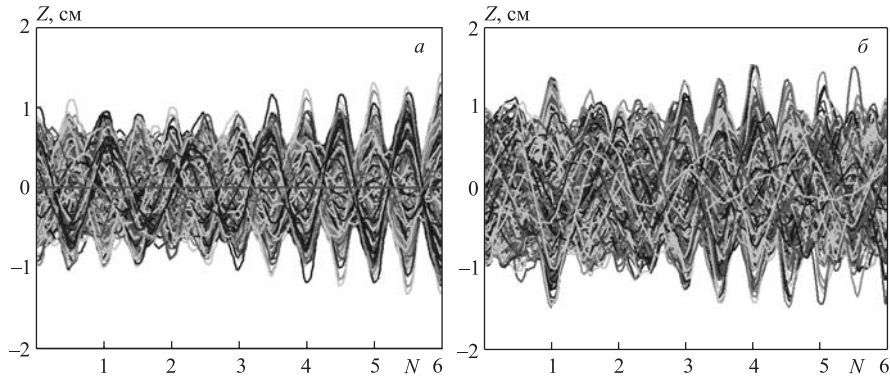


Рис. 10. Аксиальное движение частиц ( $I = 0$  мА (а),  $I = 30$  мА (б))

систем циклотрона. Моделирование динамики частиц проводилось для банча с фазовой протяженностью  $16^\circ$  ВЧ, частицы равномерно распределялись внутри фазовых эллипсов (аксиальный и радиальный эмиттансы на инжекции составляли  $50 \pi \cdot \text{мм} \cdot \text{мрад}$ ). Количество макрочастиц в расчетах не превышало 10 000.

Из рис. 9, а, б видно, что орбиты пучка ионов разделены в обоих вариантах (при  $I = 0$  мА и при  $I = 30$  мА), хотя и разделение орбит существенно уменьшается с увеличением тока пучка: для  $I = 30$  мА зона, свободная от частиц,  $\sim 2$  см в секторах и  $\sim 3$  см в долинах. Шаг орбит в зоне вывода (радиальное расстояние между центрами двух последних орбит) составляет  $\sim 6$  см.

На рис. 10, а, б, показано аксиальное движение частиц, также для двух значений интенсивности пучка. Наблюдается небольшое увеличение размера пучка при увеличении интенсивности. Видно, что при данной вариации магнитного поля при токе до 30 мА аксиальный размер пучка меньше 3 см.

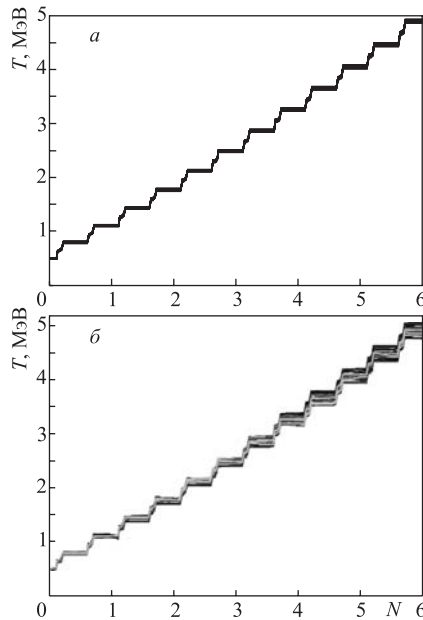


Рис. 11. Зависимость энергии частиц от номера оборота ( $I = 0$  мА (а),  $I = 30$  мА (б))

На рис. 11, *а*, *б*, показаны зависимости энергии пучка частиц от номера оборота для токов  $I = 0$  мА, 30 мА соответственно. Видно, что энергетический разброс на выводе составляет  $\pm 0,05$  МэВ, или  $\pm 1\%$ , при среднем токе пучка 0 мА и  $\pm 0,15$  МэВ, или  $\pm 3\%$ , при токе 30 мА.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Представлены основные параметры циклотрона-инжектора ЦИ-5, результаты компьютерного моделирования его основных систем и динамики пучка ионов с учетом эффектов пространственного заряда.

Численные расчеты динамики частиц показали, что необходимый набор энергии происходит за шесть оборотов, разделение орбит сохраняется на протяжении всего цикла ускорения при интенсивности тока вплоть до 30 мА, амплитуда аксиальных колебаний при этом не превышает 1,5 см, энергетический разброс при токе 30 мА заметно увеличился, но не превышает  $\pm 0,15$  МэВ.

Кроме прикладной цели — увеличения интенсивности фазотрона ОИЯИ — создание циклотрона-инжектора позволит, продемонстрировав ускорение сильноточных пучков в циклическом ускорителе, приступить к разработке ускорительных комплексов, предназначенных для использования в энергетике, для трансмутации отработанного ядерного топлива и радиоактивных отходов и других практических применений, требующих пучков большой мощности.

### ЛИТЕРАТУРА

1. *Морозов Н. А., Онищенко Л. М.* Выбор параметров линии инжекции пучка из циклотрона ЦИ-5 в фазотрон ОИЯИ. Сообщение ОИЯИ Р9-2003-14. Дубна, 2003.
2. *Калиниченко В. В., Карамышева Г. А.* Компьютерное моделирование ускоряющего поля и динамики частиц в циклотроне-инжекторе для фазотрона ОИЯИ. Препринт ОИЯИ Р9-2002-169. Дубна, 2002.
3. *Онищенко Л. М. и др.* Численное моделирование эффектов пространственного заряда в секторном циклотроне // Материалы международного семинара по динамике и оптимизации пучков, С.-Петербург, 2002.
4. *Калиниченко В. В., Карамышева Г. А.* Моделирование эффектов пространственного заряда в циклотроне-инжекторе в фазотрон ОИЯИ. Сообщение ОИЯИ Р9-2002-57. Дубна, 2002.
5. *Karamysheva G. A., Onischenko L. M., Vorozhtsov S. B.* Space charge effects in a high-current injector cyclotron, EPAC, 2000. Vienna, 2000. P. 548. // *Physics of Particles and Nuclei*, Lett. 2001. No. 2[105]-2001. P. 56–60.
6. *Ворожцов А. С. и др.* Эффекты продольного пространственного заряда пучка в циклотроне-инжекторе для фазотрона ОИЯИ. Сообщение ОИЯИ Р9-2001-195. Дубна, 2001.

Получено 4 ноября 2004 г.

Редактор *М. И. Зарубина*

Подписано в печать 26.01.2005.

Формат 60 × 90/16. Бумага офсетная. Печать офсетная.

Усл. печ. л. 0,5. Уч.-изд. л. 0,63. Тираж 290 экз. Заказ № 54756.

Издательский отдел Объединенного института ядерных исследований  
141980, г. Дубна, Московская обл., ул. Жолио-Кюри, 6.

E-mail: [publish@pds.jinr.ru](mailto:publish@pds.jinr.ru)

[www.jinr.ru/publish/](http://www.jinr.ru/publish/)